

# Control visual dinámico en una PKM para el seguimiento y golpeo de una pelota de Ping-Pong

Alberto Traslosheros, José María Sebastián, Luis Angel, Flavio Roberti, Ricardo Carelli

**Resumen**—En el presente trabajo se describe un controlador innovador que es utilizado en la realización de tareas dinámicas con aplicación en la plataforma Robotenis. Esta plataforma está compuesta principalmente por un robot paralelo dotado de un sistema de adquisición y procesamiento visual. La plataforma Robotenis tiene una arquitectura de control abierta con el objetivo de diseñar, implementar y comparar estrategias de control visual y articular. En las siguientes secciones se describe una nueva estrategia de control visual, especialmente diseñada para el seguimiento de objetos dinámicos en el espacio tridimensional. En contraste con estrategias estudiadas en trabajos previos, donde la referencia de control es constante, en este trabajo se contemplan referencias dinámicas de seguimiento. Mediante este controlador, los cambios de referencia pueden ser utilizados para sujetar objetos bajo movimiento o como en nuestro caso para golpear una pelota de ping-pong. En el diseño del controlador se realiza un análisis de estabilidad por Lyapunov.

## I. INTRODUCCIÓN

DURANTE los últimos años se ha visto un incremento en el uso de sistemas visuales en aplicaciones robóticas. En parte se debe a que una ventaja importante en estos sistemas sensoriales es la cantidad de información que captan de su entorno sin necesidad de realizar contacto físico alguno. Posteriormente, esta información visual debe ser procesada con el objetivo de extraer la información útil; en el área de robótica resulta de particular interés extraer la posición y orientación de los objetos de la tarea del robot. La integración de sistemas robótico en tareas dinámicas presenta distintas temáticas que aún se encuentran en estudio por los principales centros de investigación [1][2]. Estos tópicos incluyen, entre otros, el diseño de técnicas de seguimiento en el control en robots a alta velocidad, como las tareas de seguimiento (hasta  $2\text{ m/s}$ ) que han sido estudiadas en la Universidad de Tokio ([3], [4] y [5]). Con el objetivo de estudiar e implementar diferentes estrategias de control servo visual, el grupo de visión de la universidad politécnica de Madrid optó por diseñar e implementar la plataforma Robotenis. En la Fig. 1 se puede apreciar que la

plataforma está básicamente formada por un Robot paralelo de 3 GDL inspirado en el robot Delta [6]. Robotenis fue diseñada con una filosofía de arquitectura abierta en su estructura de control así como en su sistema de adquisición y análisis visual. Adicionalmente, la plataforma ha sido creada con el objetivo de realizar seguimiento de objetos a alta velocidad en entornos dinámicos. En este artículo se presenta un nuevo control servo visual para seguimiento dinámico y con aplicación en el golpeo de una pelota de ping-pong.

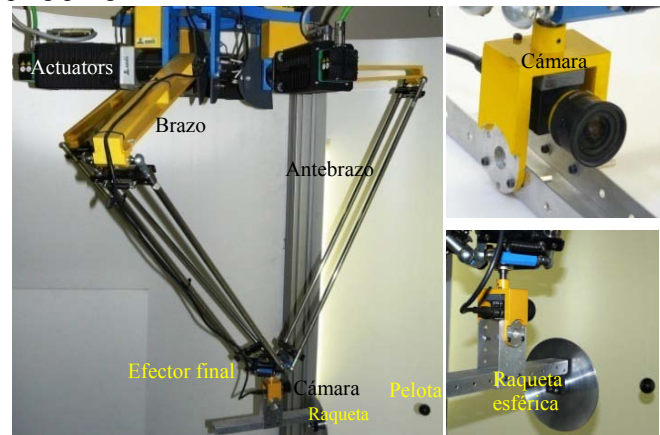


Fig. 1 Plataforma Robotenis.

De forma general un robot paralelo está formado por dos plataformas que se encuentran ligadas por más de una cadena cinemática cerrada. De esta forma la estructura cinemática que se forma proporciona múltiples ventajas en comparación con los robots seriales: Alta rigidez estructural, alta precisión de posicionamiento, gran capacidad de carga, alta velocidad y aceleración del efector final, así como una baja inercia del sistema reflejada en los actuadores. Por otro lado los robots paralelos tienen como principal desventaja su reducido espacio de trabajo.

El modelo cinemático de la plataforma Robotenis, el Jacobiano y su diseño óptimo ha sido presentado en trabajos previos [7]. La estructura cinemática del robot ha sido optimizada y su dinámica ha sido estudiada en ADAMS. De esta forma con este método de diseño se resuelven dos problemas: la determinación de las dimensiones físicas y la selección de los actuadores. El análisis dinámico y el control articular ha sido presentado en [8] y [9]. El sistema de control básicamente consiste en dos lazos: el primero que básicamente es un control articular basado en un PD, que se realiza cada  $0.5\text{ ms}$  e incorpora el modelo dinámico (basado en los multiplicadores de Lagrange) en la realimentación. El segundo lazo de control es externo al anterior, se ejecuta

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por la Universidad Politécnica de Madrid y la Agencia de Cooperación Internacional Española (AECI), bajo el proyecto: A/026481/09.

A. Traslosheros, J. M. Sebastián y L. Angel forman parte de la Universidad Politécnica de Madrid, DISAM, José Gutiérrez Abascal 2, CO 28003 Spain. Tel: (+34) 913 363 061, email: [atraslosheros@etsii.upm.es](mailto:atraslosheros@etsii.upm.es), [jsebas@etsii.upm.es](mailto:jsebas@etsii.upm.es) y [langel@etsii.upm.es](mailto:langel@etsii.upm.es).

F. Roberti and R. Carelli forman parte de la Universidad Nacional de San Juan San Juan, Av. San Martín Oeste 1109, CO 5400 Argentina. Tel: (+54) 0264 4 213 303, email: [froberti@inaut.unsj.edu.ar](mailto:froberti@inaut.unsj.edu.ar) y [rcarelli@inaut.unsj.edu.ar](mailto:rcarelli@inaut.unsj.edu.ar). Departamento de Automática, INAUT.

cada 8.4 ms, y está basado en la información recibida del sistema visual. Este segundo lazo es el objeto de estudio en el presente trabajo. Los algoritmos de control visual tratados en el presente trabajo implican el conocimiento de la posición y velocidad del objeto en movimiento (en nuestro caso pelota negra de ping-pong) cuya estimación se realiza mediante un filtro de Kalman [12].

#### A. Sistema de Control Articular

El sistema de control articular consiste principalmente de una tarjeta de control de movimiento DSPACE 1103 y donde todos los algoritmos de control del robot son realizados (en ANSI C). Estos algoritmos incluyen la planificación de trayectorias, cálculo de la cinemática y dinámica, control PD, filtro de Kalman (posición y velocidad). El sistema motor está compuesto por tres servomotores de 4 kw CA sin escobillas (Unidrive) y cajas reductoras de planetarios.

#### B. Consideraciones Adicionales del Sistema

Para el diseño de leyes de control visual, es necesario tomar en cuenta algunas características especiales inherentes al sistema, como pueden ser: ruido en los datos adquiridos por el sistema visual, el periodo de muestreo visual y articular, retraso en la adquisición visual, saturación de los actuadores, etc. Algunas de esas limitaciones forman por sí mismas un importante desafío. A este respecto se puede mencionar que el efecto producido por variaciones en la imagen correspondientes a 0.25 pixeles puede producir un error en la estimación de la velocidad de la pelota cercano a 1 m/s (considerando que la pelota se encuentra a 600 mm de la cámara en el sentido de su eje z). Adicionalmente, el retraso en la adquisición visual del sistema está estimado en dos muestras ( $2T = 16.7$  ms). Este retraso está motivado por diferentes procesos como son la integración de la imagen en la cámara, la transmisión de los datos así como el procesamiento de la imagen.

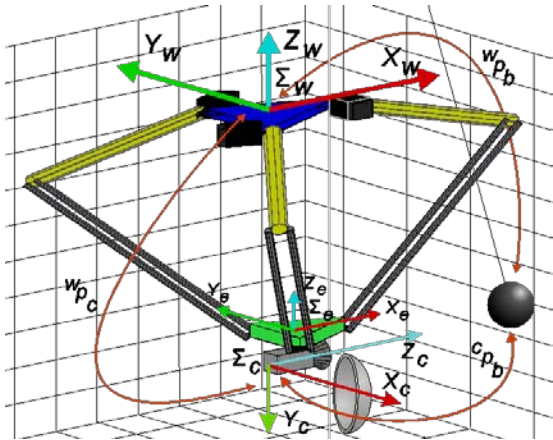


Fig. 2 Sistemas de referencia considerados en el sistema Robotenis.

Las saturaciones de los actuadores se consideran en el planificador de trayectorias, donde el máximo Jerk, la máxima aceleración y velocidad se toman en cuenta planificando trayectorias alternativas cuando se sobrepasan los límites de diseño [13].

## II. CONTROL SERVO VISUAL

Con el objetivo de diseñar el control servo visual, en esta sección se comenzará por definir los sistemas de referencia que se muestran en la Fig. 2. Los sistemas de referencia se denotan por:  $\Sigma_w$ ,  $\Sigma_e$  y  $\Sigma_c$  que son los sistemas de referencia del mundo, del effector final y de la cámara respectivamente. La posición del effector final del robot está definida en el sistema de referencia del mundo como  ${}^w p_e$  y que es conocido a través de la cinemática directa del robot,  ${}^c p_b$  es la posición de la pelota en el sistema coordenado de la cámara y  ${}^w p_b$  es la posición de la pelota en el sistema coordenado del mundo. En el presente trabajo se suponen conocidas las matrices de rotación y las transformaciones siguientes:  ${}^w R_e$ ,  ${}^w R_c$ ,  ${}^e R_c$  y  ${}^e T_c$ , que se obtienen a través del modelado del sistema y procesos de calibración.

Actualmente dentro del control servo visual existen una variedad de controladores bien establecidos [14][15]. En este artículo se presenta un controlador visual de seguimiento que está basado en la arquitectura de cámara en mano conocida en la literatura como: control mirar y mover dinámico basado en posición [16] (PBVS). Con el objetivo de abordar el problema, se seleccionó la arquitectura PBVS. Esta selección se debe a que al conocer la geometría del objeto, se puede utilizar solo una cámara. Una vez conocido esto, el error se puede obtener (tal como se muestra en la Fig. 3) como la diferencia entre la posición deseada de la pelota ( ${}^c p_b^*(k)$ ) y la posición que se obtiene a través del sistema de visión ( ${}^c p_b(k)$ ), ambos en el sistema de referencia de la cámara y en el periodo de muestreo  $k$ . A diferencia de trabajos anteriores, donde la posición deseada  ${}^c p_b^*(k)$  es fija [17], en este trabajo la referencia es variable en el tiempo. En este punto la señal de control y la estabilidad es analizada bajo este nuevo supuesto. Como resultado, la salida del controlador representa la velocidad a la que debe moverse el effector final del robot para que el error decrezca exponencialmente a “cero”. Por otro lado la señal de control articular es obtenida a través del Jacobiano del robot y el planificador de trayectorias.

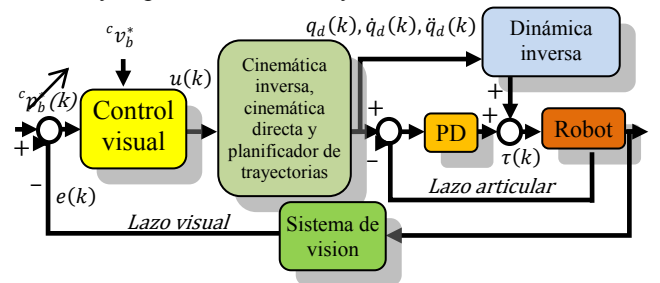


Fig. 3 Esquema de control básico del sistema Robotenis.

#### A. Diseño del Controlador Visual

De la figura 3 el error puede obtenerse como:

$$e(k) = {}^c p_b^*(k) - {}^c p_b(k) \quad (1)$$

Donde  ${}^c p_b^*(k)$  es la posición deseada y  ${}^c p_b(k)$  es la medida por el sistema de visión, ambas en el sistema coordenado de la cámara. De la ec. (1) se puede obtener.

$$e(k) = {}^c p_b^*(k) - {}^c R_w \left( {}^w p_b(k) - {}^w p_c(k) \right) \quad (2)$$

Derivando la ec. (2) respecto al tiempo se obtiene:

$$\dot{e}(k) = {}^c v_b^*(k) - {}^c R_w \left( {}^w v_b(k) - {}^w v_c(k) \right) \quad (3)$$

De las ecs. (2) y (3) se observa que  ${}^c p_b^*(k)$  es variable en el tiempo y su derivada no es cero sino que  ${}^c v_b^*(k)$  será la velocidad deseada de aproximación al objeto. Asimismo la velocidad deseada de aproximación es utilizada para realizar el golpeo de la pelota y  ${}^c v_b^*(k)$  se puede aproximar a:

$${}^c v_b^*(k) = \left( {}^c p_b^*(k) - {}^c p_b^*(k-1) \right) / T \quad (4)$$

Para lograr un decrecimiento exponencial del error se considera un error con la siguiente dinámica:

$$\dot{e}(k) = -\lambda e(k) \quad (5)$$

Donde  $\lambda > 0$  y constante. Por otro lado sustituyendo (1) y (3) en (5) obtenemos:

$$\begin{aligned} {}^c v_b^*(k) - {}^c R_w \left( {}^w v_b(k) - {}^w v_c(k) \right) \\ = -\lambda \left( {}^c p_b^*(k) - {}^c p_b(k) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Despejando la velocidad de control se obtiene:

$$\begin{aligned} {}^w v_c(k) = {}^w v_b(k) \\ - {}^c R_w^T \left( \lambda \left( {}^c p_b^*(k) - {}^c p_b(k) \right) + {}^c v_b^*(k) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Adicionalmente se considera que la distancia entre la cámara y el effector del robot es fija, por este motivo la velocidad de la cámara es la misma que la del effector final. Por otro lado tomando en cuenta que las mediciones de el sistema visual contienen una alta componente con ruido y se deben utilizar datos estimados:  ${}^c \hat{p}_b(k)$  y  ${}^w \hat{v}_b(k)$ , de esta forma la salida del controlador se convierte en:

$$\begin{aligned} u(k) = {}^w \hat{v}_c(k) = {}^w \hat{v}_b(k) \\ - {}^c R_w^T \left( \lambda \left( {}^c p_b^*(k) - {}^c \hat{p}_b(k) \right) + {}^c v_b^*(k) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

### B. Parámetro $\lambda$

Una vez que se obtiene el controlador en la ec. (8) el siguiente paso es la obtención del parámetro  $\lambda$ . Considerando que el muestreo es lo suficientemente rápido y  $n$  lo suficientemente “pequeña”:

$${}^w p_b(k+n) \cong {}^w p_b(k) + nT {}^w v_b(k) \quad (9)$$

Que en forma similar:

$${}^w p_c(k+n) \cong {}^w p_c(k) + nT {}^w v_c(k) \quad (10)$$

y

$${}^c p_b^*(k+n) \cong {}^c p_b^*(k) + nT {}^c v_b^*(k) \quad (11)$$

Para un error cero en la ecuación (2) en el instante  $k+n$ :

$$0 = {}^c p_b^*(k+n) - {}^c R_w \left( {}^w p_b^*(k+n) - {}^w p_c(k+n) \right) \quad (12)$$

Sustituyendo (9), (10) y (11) en (12):

$$\begin{aligned} 0 = {}^c p_b^*(k) + nT {}^c v_b^*(k) \\ - {}^c R_w \left( {}^w p_b(k) - {}^w p_c(k) + nT \left( {}^w v_b(k) + {}^w v_c(k) \right) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

De esta última expresión es posible obtener:

$$\begin{aligned} nT {}^w v_c(k) = nT {}^w v_b(k) - {}^c R_w^T \left( {}^c p_b^*(k) + nT {}^c v_b^*(k) \right) \\ + {}^w p_b(k) - {}^w p_c(k) \end{aligned} \quad (14)$$

Tomando en cuenta que  ${}^c p_b(k)$  y  ${}^w v_b(k)$  deben ser estimadas, que  ${}^w \hat{p}_b(k) - {}^w p_c(k)$  puede ser expresado como  ${}^c R_w^T \left( {}^c \hat{p}_b(k) \right)$  y sustituyendo en la ec. (14) se obtiene:

$$\begin{aligned} {}^w \hat{v}_c(k) = {}^w \hat{v}_b(k) \\ - {}^c R_w^T \left( \frac{1}{nT} \left( {}^c p_b^*(k) - {}^c \hat{p}_b(k) \right) + {}^c v_b^*(k) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

De la ec. Anterior y comparándola con (8) podemos ver que un buen valor para  $\lambda$  puede ser  $\lambda = 1/(nT)$  para una “ $n$ ” “suficientemente pequeña”.

### C. Estabilidad de lazo Control Visual

En esta sección la estabilidad del lazo de control visual se estudia por medio de la teoría de estabilidad de Lyapunov. De esta forma es posible demostrar que bajo condiciones ideales el error converge a cero pero si las condiciones no son ideales, entonces se puede probar que es posible acotar el error. Para probar la estabilidad del controlador comenzaremos recordando las ecuaciones (3) y (7) que se utilizarán en la ecuación:

$$\dot{e}(k) = -\lambda e(k) \quad (16)$$

Se elige como función candidata de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} e^T(k) e(k) \quad (17)$$

De (17) y (16):

$$\dot{V} = e^T(k) \dot{e}(k) = -e^T(k) \lambda e(k) \quad (18)$$

Podemos observar que (18) es siempre negativa ( $\lambda > 0$ ), sin embargo, también sabemos que  ${}^w v_b \equiv u$  no es cierta por lo que  $\dot{e}(k)$  no es exactamente igual a  $\lambda e(k)$  y la ec. (18) no se cumple plenamente. Por la razón anterior se considera un error  $\rho(k)$  y se tiene que:

$${}^w \hat{v}_c(k) = u(k) = {}^w v_c(k) + \rho(k) \quad (19)$$

Donde  $\rho(k)$  tiene en cuenta los errors que se comenten en las estimaciones y en la dinámica del sistema que no se modela. Sustituyendo el valor estimado  ${}^w \hat{v}_c(k)$  (ec. (19)) de  ${}^w v_c(k)$  en la ec. (3):

$$\dot{e}(k) = {}^c v_b^*(k) - {}^c R_w \left( {}^w v_b(k) - {}^w v_c(k) - \rho(k) \right) \quad (20)$$

Sustituyendo la ec. (7) en la ec. (20) se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{e}(k) = {}^c v_b^*(k) - {}^c R_w \left[ {}^c R_w^T \left( \lambda \left( {}^c p_b^*(k) - {}^c p_b(k) \right) \right. \right. \\ \left. \left. + {}^c v_b^*(k) \right) \right] - \rho(k) \end{aligned} \quad (21)$$

Simplificando:

$$\begin{aligned} \dot{e}(k) = {}^c v_b^*(k) - {}^c v_b^*(k) + {}^c R_w \rho(k) \\ - \lambda \left( {}^c p_b^*(k) - {}^c p_b(k) \right) \\ = {}^c R_w \rho(k) - \lambda e(k) \end{aligned} \quad (22)$$

Sustituyendo la ec. (20) en la función candidata de Lyapunov expresada en la ec. (17) tenemos:

$$\dot{V} = e^T(k) \dot{e}(k) = -e^T(k) \lambda e(k) + e^T(k) {}^c R_w \rho(k) \quad (23)$$

De la ecuación anterior,  $\dot{V} < 0$  se cumple si:

$$\|e\| > \frac{\|\rho\|}{\lambda} \quad (24)$$

Finalmente si analizamos cuando  $\rho(k) \rightarrow 0$  entonces el error  $e(k) \rightarrow 0$  pero si (24) no se cumple, finalmente el error queda acotado por:

$$\|e\| < \frac{\|\rho\|}{\lambda} \quad (25)$$

De (25) podemos observar que el error decrecerá o se incrementará dependiendo del error en las estimaciones. Con el objetivo de obtener  $\rho(k)$  considérese que las estimaciones del error de posición y velocidad son mayores que los errores introducidos por la dinámica no modelada del sistema, asimismo  $\rho(k)$  se puede obtener de (7), (8) y (19).

$$u(k) = {}^w\hat{v}_b(k) - {}^cR_w^T \left[ \lambda \left( {}^c\hat{p}_b^*(k) - {}^c\hat{p}_b(k) \right) + {}^c\hat{v}_b^*(k) \right] \quad (26)$$

$$u(k) = \rho(k) + {}^w\hat{v}_b(k) - {}^cR_w^T \left[ \lambda \left( {}^c\hat{p}_b^*(k) - {}^c\hat{p}_b(k) \right) + {}^c\hat{v}_b^*(k) \right]$$

Finalmente  $\rho(k)$  se puede expresar como:

$$\rho(k) = {}^w\hat{v}_b(k) - {}^wv_b(k) + {}^cR_w^T \left( {}^c\hat{p}_b(k) - {}^cp_b(k) \right) \quad (27)$$

### III. RESULTADOS

En esta sección el controlador mostrado en la ec. (8) se somete a pruebas y compara con un controlador mostrado en trabajos previos [17].

#### A. Prueba de Desempeño del Controlador

En la realización de los experimentos se considera que las mediciones en el espacio cartesiano están desacopladas y los movimientos rotacionales no se toman en cuenta. Lo anterior es posible suponerlo gracias a que las características esféricas del objeto en cuestión permiten el desacople de los grados de libertad traslacionales del objeto (sin importar que se cuente con un sistema monocular). De esta forma la posición  $X$  e  $Y$  (en coordenadas de la cámara) se miden a partir del centroide del objeto y la distancia en el eje  $Z$  se obtiene a partir del diámetro (que es detectado con precisión sub-píxel). Respecto a este último punto el comportamiento del controlador puede presentar un incremento en el error en el eje  $Z$ , esto se debe a la incidencia del ruido especialmente crítico en el cálculo del diámetro. Por esta razón la diferencia en las mediciones inspira pruebas separadas en los ejes  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  (considere que el eje  $X$  del robot representa el eje  $Z$  de la cámara, el  $Y$  del robot representa el  $X$  de la cámara y el  $Z$  del robot representa el  $Y$  de la cámara). Con el objetivo de contrastar resultados, se hace una comparación con un controlador previamente diseñado para realizar un seguimiento con referencia constante [17]. Este controlador previo se muestra en la ec. (28) y su diseño es similar al presentado en este trabajo.

$$u(k) = {}^w\hat{v}_b(k) - {}^cR_w^T \left[ \lambda \left( {}^c\hat{p}_b^*(k) - {}^c\hat{p}_b(k) \right) \right] \quad (28)$$

Adicionalmente, como herramienta de comparación se

diseña un índice que tiene por objetivo aislar los errores de ambos controladores (8) y (28).

$$\text{Tracking error index} = \frac{\sum_k \|e_{xyz}\|}{\sum_k \|{}^w\hat{v}_b\|} \quad (29)$$

En donde  $e_{xyz}$  es un vector del error de seguimiento en los tres ejes. Similarmente  ${}^w\hat{v}_b$  es el vector de la velocidad estimada de la pelota. De forma complementaria, para asegurar condiciones similares, las referencias de posición y velocidad del controlador son cambiadas en el tiempo por una función analítica (curva alabeada en el tiempo). Esto último se considera así porque en un caso real conocemos la velocidad a la que se desea golpear a partir de las estimaciones.

TABLA I

Resultados del error de seguimiento definido en (29). Se realizan dos tipos de movimiento donde la pelota se deja fija (estático) o se mueve (dinámico) principalmente a lo largo del eje bajo prueba. Se muestran las pruebas por eje para cada tipo de movimiento (seis primeras pruebas) y en las dos últimas pruebas el movimiento de la pelota se considera en los 3 ejes simultáneamente.

Movimiento relativo.	Error de seg. del controlador, ec. (8)	Error de seg. del controlador, ec. (28)	Tipo de movimiento de la pelota
<b>X</b>	5.795	12.225	Estático
<b>Y</b>	5.618	12.035	
<b>Z</b>	5.360	11.742	
<b>X</b>	9.536	15.428	Dinámico
<b>Y</b>	9.488	15.358	
<b>Z</b>	9.679	15.538	
<b>XYZ</b>	7.869	13.826	Estático
<b>XYZ</b>	11.956	18.659	Dinámico

En la tabla 1 se muestran los resultados al aplicar el índice expresado en (29). La tabla 1 la media de los resultados obtenidos al aplicar 100 pruebas con diferentes parámetros de las curvas de referencia (curvas alabeadas), y cada prueba consiste de  $k = 5000$  muestras. Las pruebas se realizan por eje y para cada tipo de movimiento, es decir que las pruebas estáticas se consideran con la pelota fija y en las dinámicas se mueve la pelota en el eje designado (aunque la pelota tiene pequeños movimientos en ejes diferentes al de la prueba). Las seis primeras pruebas muestran resultados por cada eje y en las dos últimas pruebas se muestran los resultados cuando la referencias modifica en los 3 ejes simultáneamente. Adicionalmente se muestran dos experimentos particulares en la fig. 4 relacionados con la Tabla 1. En términos generales se puede apreciar que el efecto del controlador dinámico mejora los errores casi a la mitad cuando los movimientos son realizados a lo largo de un solo eje. En la figura 4 a) y b) se muestra la evolución temporal de los errores en el eje  $Y$ , reduciéndose de 5.618 a 12.035. En la figura 4 c) y d) se muestra una evolución temporal de los errores al modificar simultáneamente la referencia y la posición de la pelota, logrando una reducción de 18.659 a 11.956 (ver tabla 1).

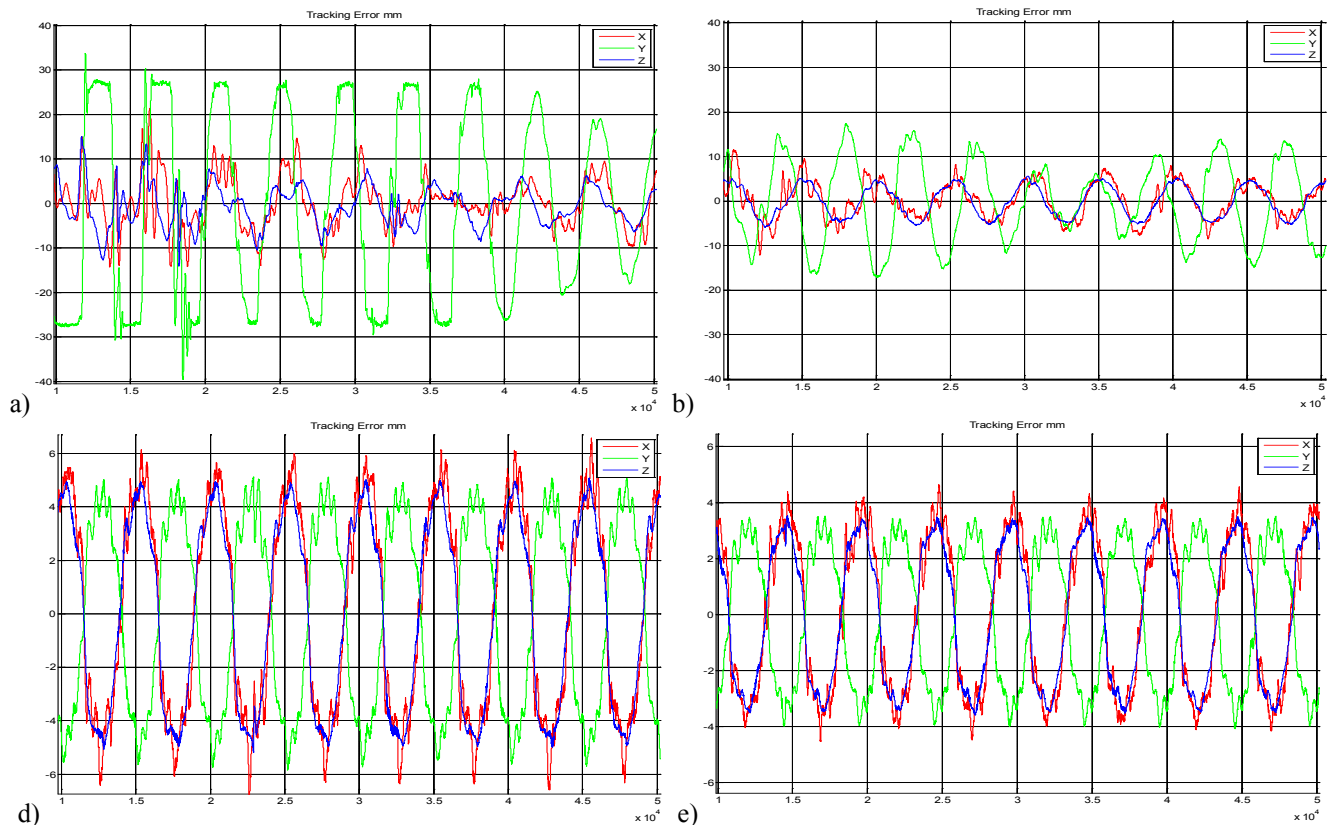


Fig. 4 se muestran dos ejemplos de la evolución del error en el espacio cartesiano. Figuras a) y b) muestran el error de posicionamiento (de ambos controladores) cuando la pelota está fija y la referencia es cambiada en el tiempo a lo largo del eje  $y$ . a) muestra los errores producidos en el tiempo al utilizar el controlador en la ec. (28). b) Muestra los errores temporales que se producen al utilizar el controlador en la ec. (8). Figuras c) y d) muestran el error de posicionamiento (de ambos controladores) cuando la pelota se mueve en XYZ y la referencia es cambiada en el tiempo a lo largo de los ejes XYZ simultáneamente, c) muestra los errores producidos en el tiempo al utilizar el controlador en la ec. (28). d) Muestra los errores temporales que se producen al utilizar el controlador en la ec. (8).

### B. Estrategia de Golpeo

Adicionalmente a los resultados mostrados anteriormente que se realizaron para probar el controlador propuesto en (8), se ha diseñado una estrategia de golpeo con la cual probar su eficacia en una aplicación dinámica que requiere cambio de referencia y que el objeto está bajo movimiento.

De forma básica la estrategia de golpeo consiste en golpear la pelota en una posición que es conocida a través de las estimaciones de la trayectoria que lleva la pelota. La trayectoria de la pelota deberá pasar dentro del espacio de trabajo del robot como requisito mínimo. Adicionalmente el espacio de trabajo se ha dividido en tres planos perpendiculares al eje  $Z$  de la cámara, Fig. 5. De esta forma cuando la pelota se encuentra lejana y fuera del espacio de trabajo del robot (más allá del plano 1) el robot realiza exclusivamente un seguimiento suave en el plano  $XY$  de la cámara. Esto se hace con dos objetivos: para garantizar que la pelota no se sale del campo de visión de la cámara y para garantizar que la pelota estará relativamente cerca de la raqueta en momentos previos al golpeo, esto se puede apreciar de la Fig. 5 y Fig. 6. La segunda área del espacio de trabajo está limitada por los planos 1 y 2, en esta área la pelota puede salirse del campo de trabajo del robot. Por tal motivo es en esta área donde se decide el momento y punto

del golpeo, así como la velocidad y el efecto que se desea dar por medio de la raqueta esférica (forma necesaria en la raqueta pues el robot carece de la capacidad para orientar el efector terminal). Cuando la pelota está fuera del campo de visión el robot es guiado por la estimación de la trayectoria de la pelota y por el controlador visual hasta el punto de golpeo. Cabe destacar que durante el golpeo la raqueta impide localizar la pelota por lo que la estimación de la trayectoria de la pelota así como el filtrado es clave para un golpeo correcto. En el plano 3 se describe el lugar donde el robot realiza un seguimiento de la pelota solamente en el plano  $XY$  (anterior y posteriormente al golpeo), esto se aprecia en la Fig. 5 que se complementa con la Fig. 6. Un video donde se muestran resultados del experimento de golpeo puede encontrarse en:

<http://www.disam.upm.es/vision/projects/robotenis/>

### CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una nueva ley de control visual para realizar seguimiento dinámico. El controlador propuesto está diseñado específicamente para realizar tareas de seguimiento dinámico como pueden ser atrapar o golpear (con una determinada velocidad) objetos en movimiento en el espacio tridimensional. Como entorno de pruebas se



propone una pelota negra en un fondo blanco para simplificar el análisis visual y realizar un muestreo a mayor velocidad. El controlador propuesto se compara con una ley de control anterior diseñada en un trabajo previo y con el objetivo de analizar el comportamiento del nuevo controlador. Los resultados mostrados indican una reducción del error de más del 40% respecto al controlador anterior.

Adicionalmente en la página de la plataforma Robotenis se puede descargar un video donde se le observa realizando un golpeo de la pelota utilizando este Nuevo controlador.

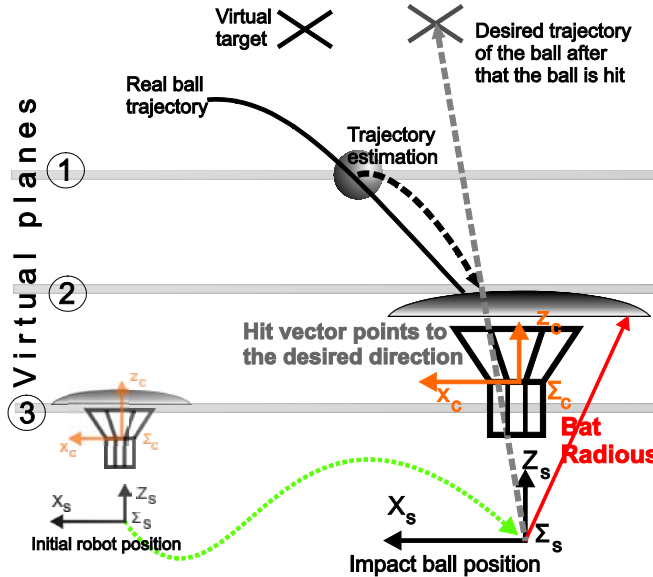


Fig. 5 Esquema básico de las áreas del espacio de trabajo.

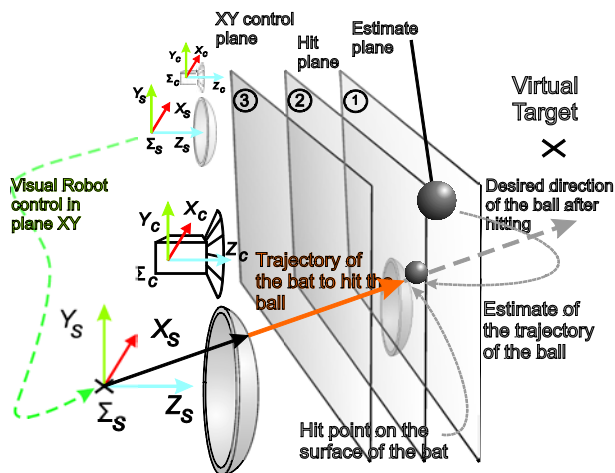


Fig. 6 Esquema complementario de las áreas de trabajo.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen por el soporte financiero para la realización de este proyecto principalmente a las siguientes instituciones: Agencia de cooperación española (AECI), Universidad Politécnica de Madrid de Madrid España. PROMEP y a la Universidad Autónoma de Querétaro de Querétaro, México. A la Universidad Nacional de San Juan de San Juan, Argentina.

#### REFERENCIAS

- [1] D. Kragic and H. Christensen, "Advances in robot vision," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 52, 2005, p. 1–3.
- [2] N. Oda, M. Ito, and M. Shibata, "Vision-based motion control for robotic systems," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 4, 2009, p. 176–183.
- [3] M. Kaneko, M. Higashimori, R. Takenaka, A. Namiki, and M. Ishikawa, "The 100 G capturing robot- too fast to see," *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 8, 2003, p. 37–44.
- [4] T. Senoo, A. Namiki, and M. Ishikawa, "High-speed batting using a multi-jointed manipulator," *IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, Citeseer, 2004, p. 1191–1196.
- [5] T. Senoo, Y. Yamakawa, S. Mizusawa, A. Namiki, M. Ishikawa, and M. Shimajo, "Skillful manipulation based on high-speed sensory-motor fusion," *Proceedings of the 2009 IEEE international conference on Robotics and Automation*, IEEE Press, 2009, p. 4252–4253.
- [6] R. Clavel, "Conception d'un robot parallele rapide a4 degrés de liberté," *These de Doctorat*, 1991.
- [7] L. Silva, J. Sebastian, R. Saltaren, R. Aracil, and J. Sanpedro, "RoboTennis: optimal design of a parallel robot with high performance," *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005)*, Ieee, 2005, p. 2134–2139.
- [8] L. Ángel, J. Sebastián, R. Saltarén, R. Aracil, and R. Gutiérrez, "RoboTennis: design, dynamic modeling and preliminary control," *2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings*, 2005, p. 747–752.
- [9] L. Angel, J. Sebastian, R. Saltaren, and R. Aracil, "Robo Tennis System Part II: Dynamics and Control," *IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL*, IEEE, 1998, 2005, p. 2030.
- [10] J. Sebastián, "Robotenis System," <http://www.disam.upm.es/vision/projects/robotenis/>, 2010.
- [11] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 22, 2000, p. 1330–1334.
- [12] G. Welch, Greg ; Bishop, "The Kalman Filter. Some tutorials, references, and research related to the Kalman filter" <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/>, 2010.
- [13] A. Traslosheros, J. Sebastián, L. Ángel, F. Roberti, and R. Carelli, "Visual servoing using a parallel robot: Preliminary results," *Advanced intelligent mechatronics*, Zurich: 2007, p. 4–7.
- [14] F. Chaumette and S. Hutchinson, *Visual servo control. I. Basic approaches*, 2006.
- [15] F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual servo control, part II: Advanced approaches," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 14, 2007, p. 109–118.
- [16] S. Hutchinson, G. Hager, and P. Corke, *A tutorial on visual servo control*, 1996.
- [17] L. Angel, A. Traslosheros, J. Sebastian, L. Pari, R. Carelli, and F. Roberti, "Vision-Based Control of the RoboTennis System," *LECTURE NOTES IN CONTROL AND INFORMATION SCIENCES*, vol. 370, 2008, p. 229.